



QIC2016

2.º ENCONTRO NACIONAL SOBRE QUALIDADE E INOVAÇÃO NA CONSTRUÇÃO

Lisboa • LNEC • 21 a 23 de novembro de 2016

SISTEMA DE ALVENARIA COM INCORPORAÇÃO DE RE- SÍDUOS

BLOCOS DE TERRA COMPACTADA COM LIGANTE GEOPOLIMÉRICO

Rui A. Silva

PhD, ISISE, ruisilva@civil.uminho.pt

Edgar Soares

MSc., ISISE, edgarsoares84@gmail.com

Daniel V. Oliveira

PhD, ISISE, danvco@civil.uminho.pt

Tiago Miranda

PhD, IB-S / ISISE, tmiranda@civil.uminho.pt

Paulo B. Lourenço

PhD, IB-S / ISISE, pbl@civil.uminho.pt

Resumo

A produção de resíduos é um problema comum a todas as sociedades, que importa gerir de forma adequada para proteger o meio ambiente do impacto que atividade do Homem lhe provoca. O setor da construção civil é responsável por uma percentagem muito importante dos resíduos produzidos anualmente a nível Mundial. Como tal, exige-se que os agentes ligados a este setor desenvolvam soluções construtivas que promovam a valorização dos resíduos, com base na sua reciclagem em novos materiais de construção. Estes materiais, ao entrarem no mercado e ao serem integrados nas construções, permitem substituir parte dos materiais correntes por materiais reciclados. Da execução de uma construção resultam resíduos compostos por diversas fileiras de materiais, de onde se destacam os solos resultantes de trabalhos de escavação, que podem ser reutilizados em trabalhos de aterro/enchimento necessários em obra, mas os solos excedentes constituem um problema a gerir. Estes solos podem ser reutilizados em outras obras ou transportados para uma bolsa de solos, onde aguardam reutilização. Em alternativa, podem constituir um recurso a ser valorizado através da promoção de um uso alternativo em obra. No presente artigo pretende-se caracterizar o desempenho mecânico de um sistema de alvenaria à base de blocos de terra compactada (BTC). Estes BTC foram desenvolvidos com base na incorporação de solo residual granítico (SRG), típico do Norte de Portugal, estabilizado com um ligante geopolimérico. Este ligante é obtido por ativação alcalina de um outro resíduo, proveniente da indústria energética, nomeadamente as cinzas volantes. O desempenho do sistema de alvenaria de BTC foi avaliado através de um programa experimental, constatando-se um bom desempenho mecânico da solução.

Palavras-chave: Solo / Cinza volante / Ativação alcalina / Reciclagem / Bloco de terra compactada

Introdução

A produção de resíduos é um problema comum a todas as sociedades, que importa gerir de forma adequada para proteger o meio ambiente do impacto que atividade do Homem lhe provoca. Existem diversos fluxos de resíduos, mas os resíduos de construção e demolição (RCD) são um dos mais importantes. Segundo o Eurostat (2015), em 2012 estima-se que na Europa (EU-28) foram gerados cerca de 800 milhões de toneladas de RCD. Em Portugal, a contabilização rigorosa dos RCD produzidos apresenta diversas dificuldades, nomeadamente a existência de dados de diferentes fontes e a persistência dos depósitos ilegais, e portanto não declarados. Apesar disto, a Agência Portuguesa do Ambiente (APA), após um processo moroso de cruzamento de informação, contabilizou a produção de cerca de 1,7 milhões de toneladas de RCD em 2009 (Martinho *et al.*; 2015), cujo elevado valor demonstra que este fluxo de resíduos assume-se também bastante importante em Portugal.

A gestão dos RCD em Portugal é regulamentada especificamente pelo Decreto-Lei n.º 46/2008. Este diploma define que a gestão de RCD deverá ser realizada de acordo com os princípios de autossuficiência da prevenção e redução, da hierarquia das operações de gestão de resíduos, da responsabilidade do cidadão, da regulação da gestão de resíduos e da equivalência, previstos no Decreto-Lei n.º 178/2006, alterado com a publicação do Decreto-Lei n.º 73/2011 (Martinho *et al.*; 2015), transpondo a Diretiva n.º 2008/98/CE. Segundo este diploma, as opções de prevenção e gestão de resíduos devem respeitar uma hierarquia de prioridades com a ordem seguinte: (i) prevenção e redução; (ii) preparação para a reutilização; (iii) reciclagem; (iv) outros tipos de valorização; (v) eliminação. Portanto, a eliminação de RCD por deposição em aterro deverá ser usada apenas como último recurso, caso não seja possível qualquer outra forma de valorização.

Os RCD apresentam várias fileiras de materiais (nomeadamente pedra, betão, tijolos, ladrilhos, telhas, materiais cerâmicos, madeira, vidro, plástico, misturas betuminosas, metais, rochas, materiais de isolamento e materiais à base de gesso), de onde se destaca o caso dos solos. Os solos, como RCD, resultam de escavações necessárias para construção de fundações ou de movimentações de terra para a construção de vias de comunicação. Este tipo de resíduo é facilmente reutilizado em aterros que precisem ser executados na obra de origem. Contudo, o material excedente tem de ser transportado para reutilização noutra obra ou para aterro (em bolsa de solo ou eliminado), traduzindo-se em custos económicos e ambientais adicionais. A reciclagem deste material através da sua incorporação em outros materiais de construção pode constituir uma forma para mitigar estes custos.

A produção de blocos de terra compactada (BTC) consiste na compactação de terra húmida em moldes metálicos, com recurso a uma prensa manual ou hidráulica (Doat *et al.*; 1996; Houben; Guillaud; 2008). A construção com alvenaria de BTC é atualmente uma das técnicas mais utilizadas para construir com terra, uma vez que a produção destes blocos constitui um processo industrializável com controlo de qualidade, permitindo obter materiais de construção com propriedades muito acima das dos materiais de terra tradicionais (Silva *et al.*; 2015). Existem diversos sistemas de alvenaria de BTC propostos, inclusive existe a possibilidade de dispensar a utilização de argamassas de assentamento, através de BTC produzidos com um sistema de encaixe (Torgal; Jalali; 2011).

O solo utilizado no fabrico de BTC é constituído por partículas de tamanho variável, nomeadamente argilas, siltes e areias, que se encontram misturados entre si em proporções variáveis (Torgal *et al.*; 2009). A incorporação de solos excedentes na fabricação de BTC pode traduzir-se em vantagens económicas e ambientais adicionais, através da produção e aplicação destes BTC em obra ou produção e comercialização de BTC produzidos em bolsas de solos excedentes. A aplicação destas unidades pode fazer-se na forma de paredes estruturais ou de paredes de enchimento de estruturas porticadas de madeira, aço ou betão armado.

Em geral, no Norte de Portugal predominam os solos residuais graníticos (SRG), cuja adequabilidade para a construção em terra é reduzida, dada a sua, tipicamente, baixa percentagem da fração argilosa. Assim, para se usar um SRG na produção de BTC torna-se necessário o recurso à sua estabilização, nomeadamente a estabilização química, na qual é adicionado um material ligante que propicia a aglutinação das partículas do solo (Silva *et al.*; 2013). O cimento e a cal são os ligantes mais populares e eficientes, contudo a sua utilização traduz-se num custo ambiental associado à sua produção. Nos últimos anos, a obtenção de ligantes poliméricos por ativação de cinzas volantes tem-se assumido como uma solução mais amiga do ambiente (Cristelo *et al.*; 2012; Cristelo *et al.*; 2015).

As cinzas volantes são um resíduo constituído por partículas minerais incombustíveis, resultantes da queima do carvão numa central termoelétrica. Estas partículas apresentam uma forma esférica de pequenas dimensões que variam entre 1 e 100µm, com valores de superfície específica compreendidos entre 250m²/kg e 600m²/kg. Apresentam propriedades pozolânicas importantes, sendo largamente utilizadas como adição em argamassas e betões, reduzindo os seus custos de fabrico e aumentando a sua resistência e durabilidade. No processo de ativação alcalina, assumem-se como uma fonte de silício e alumínio, por serem constituídas maioritariamente por dióxido de silício (SiO₂), óxido de alumínio (Al₂O₃) e óxido de ferro (Fe₂O₃). As cinzas volantes da classe F apresentam baixos teores de cálcio e propriedades não aglomerantes, necessitando de um agente de cimentação como o cimento, a cal viva, a cal hidratada ou, em alternativa, um ativador químico, como o silicato de sódio, para formar um ligante geopolimérico. Segundo Teixeira Pinto (2002) e Cristelo *et al.* (2012), a ativação alcalina apresenta-se como uma técnica inovadora e com enorme potencial na estabilização de solos. A estrutura endurecida de um ligante geopolimérico é constituída por uma malha tridimensional, em que os átomos de silício alternam com os átomos de alumínio, em coordenação tetraédrica, compartilhando todos os oxigénios, tendo resultado de uma reação de hidratação dos alumino-silicatos com substâncias alcalinas ou alcalinoterrosas em forma de hidróxidos (ROH, R(OH)₂), sais silicatados (R₂.(n)SiO₂), sais de ácidos fracos (R₂CO₃; R₂S; R₂F) ou sais de ácidos fortes (Na₂SO₄, CaSO₄.2H₂O), em que R é normalmente um ião do tipo Na⁺, K⁺ ou Ca²⁺ (Teixeira Pinto; 2002). Uma das principais vantagens dos ligantes geopoliméricos está na sua inércia química face à maior parte das agressões ambientais, apresentando níveis muito baixos de lixiviação por águas correntes, bem como valores de permeabilidade baixos quando comparados com materiais de construção correntes.

No Norte de Portugal, a implementação de um sistema construtivo em BTC produzidos com SRG estabilizado com um ligante geopolimérico poderá obter grandes benefícios ambientais, quer através da reciclagem dos SRG excedentes quer pela incorporação de cinzas volantes, que atualmente apresentam volumes de produção significativos em território nacional. Esta possibilidade é avaliada neste trabalho através da execução de um programa experimental, onde se caracteriza o desempenho mecânico do sistema construtivo adotado. Este programa experimental inclui ensaios de compressão e flexão em unidades de BTC e ensaios de caracterização da alvenaria, nomeadamente ensaios de compressão e de corte em prismas.

Programa experimental

Caracterização dos materiais

Solo

O solo utilizado na produção de BTC é um SRG e foi recolhido da freguesia de Penselo em Guimarães. Este solo foi submetido a um conjunto de ensaios geotécnicos para se caracterizarem as suas propriedades e avaliar-se a sua adequabilidade para produção de BTC. O Quadro 1 apresenta, sumariamente, a caracterização do solo.

Quadro 1: Caracterização do solo utilizado na produção dos BTC

Ensaio	Parâmetro em avaliação	Resultados
Análise Granulométrica (E 196:1966)	Gravilha e areia (%) (0.06mm<Φ≤20mm)	82
	Silte (%) (0.002mm<Φ≤0.06mm)	14
	Argila (%) (Φ≤0.002mm)	4
Limites de Consistência (NP 143:1969)	Limite de liquidez (%)	28
	Limite de plasticidade (%)	Não plástico
Densidade das Partículas (NP 83:1965)	Peso específico dos grãos (g/cm ³)	2,62
Ensaio de Proctor Leve (E 197:1966)	Teor em água ótimo (%)	12,1
	Baridade seca máxima (g/cm ³)	1,71

A curva granulométrica do solo é comparada com o fuso de SRG proposto por Viana da Fonseca (1996) na Figura 1a, verificando-se que o solo utilizado parece ser representativo deste tipo de solos. A Figura 1b compara a curva granulométrica do solo com o fuso recomendado para solos adequados

para a produção de BTC, segundo a norma UNE 41410 (2008). Esta figura mostra que a percentagem de argila do solo é demasiadamente baixa, pelo que este não deverá ser adequado para a produção de BTC. Na verdade, a norma UNE 41410 (2008) não permite a utilização de solos com percentagem em argila inferiores a 10%. Admitir um solo com percentagem de argila baixa pode levar à produção de BTC com resistência mecânica baixa e pode ter implicações no próprio processo de produção, nomeadamente com a impossibilidade de manuseamento dos BTC logo após compactação (falta de coesão inicial).

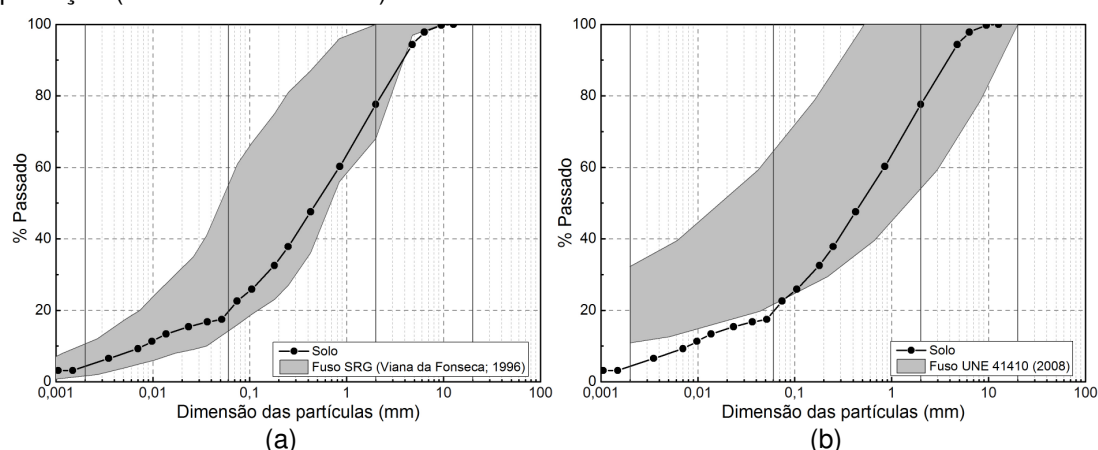


Figura 1: Comparação da curva granulométrica do solo com o fuso: (a) de SRG (Viana da Fonseca; 1996); (b) de solos recomendados para produção de BTC (UNE 41410: 2008)

Cinza volante

A cinza volante utilizada para preparar o ligante geopolimérico usado na estabilização do solo foi obtida da Central termoelétrica do Pego (PEGOP). Esta é uma cinza de classe F e é caracterizada por uma percentagem de sílica e alumina de cerca de 71%, percentagem de cálcio inferior a 5% (ver Quadro 2) e uma dimensão média das partículas de cerca de 11.64 μm .

Quadro 2: Composição química da cinza volante (obtida por espectroscopia de energia dispersa)

Elemento	Si	Al	Na	Mg	P	S	K	Ca	Ti	Fe
(%)	48,8	21,8	1,3	1,6	0,6	1,2	4,4	3,9	1,8	14,7

Ativador alcalino

O ativador alcalino utilizado para ativar a cinza volante resultou da mistura de uma solução de hidróxido de sódio com uma solução de silicato de sódio, nas proporções 2:1, respetivamente. O hidróxido de sódio foi adquirido na forma de flocos com uma pureza de 95-99%, e foi dissolvido em água, de forma a obter-se uma concentração de 12,5 molal. O silicato de sódio foi adquirido na forma de uma solução com uma percentagem de óxido de sódio (Na_2O) de cerca de 13% e um rácio de $\text{SiO}_2:\text{Na}_2\text{O}$ de cerca de 2.

Sistema construtivo em BTC

O sistema construtivo adotado neste trabalho resultou de um projeto de investigação anterior, envolvendo a Universidade do Minho e a empresa Mota-Engil SA, cujo objetivo foi o desenvolvimento de uma solução para a construção de casas sustentáveis e de baixo custo em países sísmicos (Ramos *et al.*; 2011). A geometria do BTC deste sistema consiste num bloco com aligeiramentos verticais e sistema de encaixe (Figura 2a). O sistema de aligeiramento adotado permite reduzir o peso do bloco, e a introdução de armaduras de reforço ou a passagem de instalações. O aparelho da alvenaria consiste num sistema de encaixe mecânico, conseguido sem o uso de argamassa, que permite a construção de paredes de pano simples (Figura 2b) e duplo (Figura 2c), promovendo assim uma construção mais simples, rápida e económica.

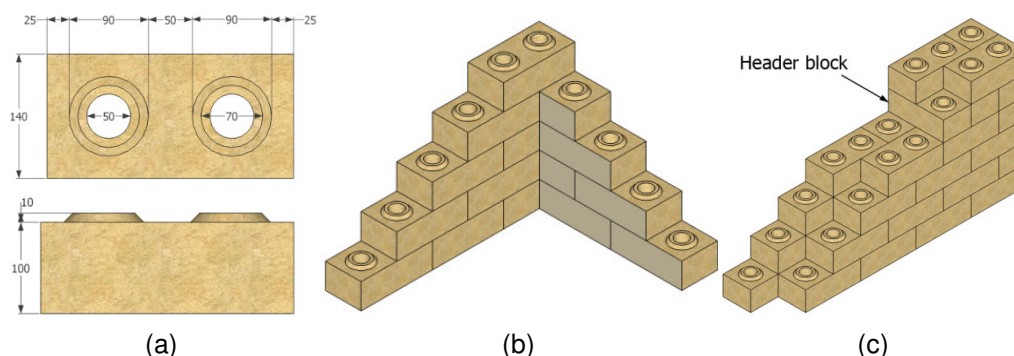


Figura 2: Sistema construtivo em BTC: (a) geometria do bloco (em mm); (b) parede simples; (c) parede dupla

Produção dos BTC

Os BTC ensaiados no programa experimental foram produzidos com duas composições com incorporação de percentagens de cinza volante diferentes, nomeadamente 10% (SFA10) e 15% (SFA15%). Estas composições são apresentadas no Quadro 3 e foram selecionadas de um estudo anterior (Soares; 2013). Note-se que o rácio Ativador : Sólidos foi definido como sendo ligeiramente superior ao teor em água ótimo do solo, compensando-se alguma falta de trabalhabilidade da mistura devido à adição da cinza volante, constituída principalmente por partículas finas.

Quadro 3: Composição das misturas utilizadas na produção dos BTC

Mistura	Solo (%)	Cinza volante (%)	Ativador : sólidos	Na ₂ O : Cinza volante (-)
SFA10	90	10	0,134	0,250
SFA15	85	15	0,137	0,170

As misturas foram preparadas numa misturadora horizontal, misturando-se primeiro as fases sólidas e depois a fase líquida, durante o tempo necessário até se atingir homogeneização. A prensagem dos BTC foi executada com uma prensa manual tipo Terstaram e controlou-se a massa de mistura introduzida no molde, para que os BTC produzidos tivessem massa semelhante (ver Figura 3). Foram produzidos cerca de 80 BTC por mistura, que curaram durante os primeiros 3 dias no chão e depois foram empilhados, permanecendo a curar ao ar no interior do laboratório (temperatura de cerca de 20±2°C). O período de cura total foi superior a 180 dias. Durante este período observou-se o surgimento de algumas eflorescências nas faces expostas ao ar, devido à carbonatação de sódio livre. Este fenómeno, aparentemente, apenas resultou numa alteração de cor, de cinzento-escuro para cinzento-claro. Note-se ainda que a adição da cinza volante e do ativador tornou possível o manuseamento dos BTC de ambas as misturas logo após a prensagem, através da introdução de uma coesão inicial semelhante à conseguida pela presença de argila.



Figura 3: Prensagem dos BTC utilizando-se uma prensa manual do tipo Terstaram

Procedimentos de ensaio

Metodologia

O programa experimental executado inclui o ensaio de BTC individuais e de prismas de alvenaria de pano simples. No caso dos BTC individuais, foram executados ensaios de compressão e flexão em provetes secos ao ar e saturados (submersos em água durante 24h). No caso dos prismas de alvenaria, foram executados ensaios de compressão e de corte, apenas na condição de secos ao ar.

Ensaio de compressão (BTC individuais)

Os ensaios de compressão dos BTC individuais foram executados de acordo com a norma EN 772-1:2011, sendo o carregamento realizado em controlo de deslocamento com uma velocidade de $4 \mu\text{m/s}$. Para cada mistura e condição de ensaio (seco ao ar ou saturado), foram ensaiados 4 provetes. De forma a evitar-se a regularização das faces dos BTC, utilizaram-se as chapas de base e topo do molde da prensa Terstaram, pois têm a capacidade de se adaptarem aos encaixes dos BTC (ver Figura 4a).

Ensaio de flexão (BTC individuais)

Os ensaios de flexão dos BTC individuais foram realizados em três pontos e seguindo o procedimento estabelecido na norma EN 772-6:2002, mas admitindo-se alguns ajustes necessários ao caso específico dos BTC ensaiados. Os provetes foram apoiados em roletes com um vão de 220 mm e a carga foi aplicada a meio vão com uma velocidade constante de $2 \mu\text{m/s}$ (ver Figura 4b). De forma a evitar-se a formação da fenda de rotura nos aligeiramentos dos BTC, os provetes foram ensaiados com um entalhe com 10 mm de profundidade e 3,5 mm de largura, localizado na secção de meio vão e realizado com uma máquina de corte a seco. Utilizaram-se LVDTs para medirem-se a deflexão e a abertura da fenda. Para cada mistura e condição de ensaio (seco ao ar ou saturado), foram ensaiados 4 provetes.



Figura 4: Esquema de ensaio dos BTC individuais: (a) compressão; (b) flexão

Ensaio de compressão (prismas)

Os prismas de alvenaria ensaiados à compressão eram constituídos por cinco BTC empilhados com junta seca. Os ensaios foram realizados de acordo com o procedimento estabelecido na norma ASTM C1314-03b:2003, mas efetuando-se o carregamento em controlo de deslocamento com velocidade constante de $2 \mu\text{m/s}$. Além disto, os deslocamentos verticais entre o segundo e o quarto BTC foram medidos com recurso a 2 LVDT fixados em cada uma das faces do prisma (ver Figura 5a). Para cada mistura foram ensaiados 4 prismas, na condição de secos ao ar.

Ensaio de corte (prismas)

Os prismas de alvenaria ensaiados ao corte eram constituídos por três BTC empilhados com junta seca. Os ensaios destes provetes seguiram o procedimento da norma EN 1052-3:2002, utilizando-se três níveis de tensão de compressão: $0,20 \text{ N/mm}^2$, $0,60 \text{ N/mm}^2$ e $0,85 \text{ N/mm}^2$. A tensão de compressão foi aplicada com recurso a um atuador vertical que manteve uma força constante durante a realização dos ensaios. A força de corte (direção paralela às juntas de assentamento) foi aplicada em controlo de deslocamento com velocidade constante de $10 \mu\text{m/s}$ com uma atuador horizontal. O deslocamento relativo do BTC intermédio (direção de corte) foi medido com recurso a dois LVDTs fixos em ambos os topos, enquanto que os deslocamentos verticais entre o BTC da base e do topo foi

medido por 2 LVDTs fixos em cada face do provete (ver Figura 5b). Para cada mistura e nível de compressão, foram ensaiados 4 prismas, na condição de secos ao ar.

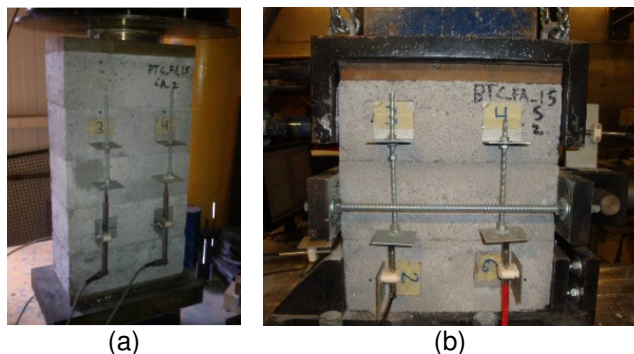


Figura 5: Esquema de ensaio dos prismas de alvenaria: (a) compressão; (b) corte

Resultados e discussão

Ensaio de compressão (BTC individuais)

Os resultados dos ensaios de compressão dos BTC individuais são resumidos no Quadro 4, em termos de massa volumica (γ_b), resistência à compressão na condição de secos ao ar ($f_{c,u}^d$) e resistência à compressão na condição de saturados ($f_{c,u}^s$). Note-se que os valores de resistência apresentados foram calculados considerando a área líquida dos BTC. Relativamente ao modo de rotura, em todos os provetes foi caracterizado pela formação de um tronco bipiramidal, devido à elevada tensão de confinamento introduzida pelas chapas de ensaio.

Quadro 4: Resultados dos ensaios de compressão dos BTC individuais (coeficiente de variação entre parêntesis)

Mistura	γ_b (kg/m ³)	$f_{c,u}^d$ (N/mm ²)	$f_{c,u}^s$ (N/mm ²)	$f_{c,u}^s / f_{c,u}^d$
SFA10	1810 (1%)	8,8 (11%)	5,6 (10%)	0,64
SFA15	1854 (1%)	12,0 (8%)	8,0 (21%)	0,67

Os BTC produzidos com a mistura SFA15 obtiveram valores médios das resistências ($f_{c,u}^d$ e $f_{c,u}^s$) superiores em cerca de 1,4 vezes, parecendo mostrar que quanto maior for a percentagem de ligante geopolimérico maior deverá ser o valor da resistência esperada. Além disto, os valores de $f_{c,u}^d$ apresentam baixa variabilidade, parecendo indicar que o processo de estabilização utilizado consegue diluir a variabilidade intrínseca de materiais produzidos com terra.

Relativamente aos BTC ensaiados na condição saturada, observou-se que os BTC das misturas SFA10 e SFA15 apresentaram uma absorção de 5,5% e 6,5% da sua massa em água, respetivamente. Isto significa que os provetes de ambas as misturas apresentam uma porosidade aberta semelhante e acima de tudo baixa. Em termos de resistência à compressão, observou-se que a saturação dos BTC resultou numa redução de 0,64 e 0,67 vezes, respetivamente, para a mistura SFA10 e SFA15. Apesar de em ambos os casos a saturação ter resultado numa redução significativa, o valor mínimo obtido foi ainda assim elevado para um material de terra, nomeadamente 4,9 N/mm² (SFA10).

De acordo com a norma UNE 41410:2008, os BTC de ambas as misturas podem ser classificados como BTC 5, que corresponde à classe mais elevada, em que a resistência à compressão normalizada (percentil 5%) é superior a 5 N/mm². A resistência à compressão normalizada é obtida através da multiplicação do fator de forma (0,92) pelo valor da resistência à compressão seca ao ar. Apesar de o número de ensaios executados não permitir uma análise estatística confiável, note-se que o valor mínimo da resistência à compressão normalizada foi de cerca de 7,3 N/mm² (SFA10).

Mais se demonstra que os valores de resistência à compressão obtidos pela estabilização com o ligante geopolimérico são superiores aos obtidos pela estabilização com cimento. Por exemplo, BTC

estabilizados com 5-10% de cimento podem atingir valores de resistência à compressão de cerca de 0,3-7,11 N/mm² (Walker; Stace; 1997). Isso significa que existe ainda margem para uma eventual otimização das misturas para fabricação de BTC com SRG estabilizado com um ligante geopolimérico. Além disto, os valores de resistência à compressão obtidos parecem indicar que este tipo de blocos poderão competir com blocos de cimento modernos. De acordo com Mohamad (2007) os blocos de cimento encontrados no mercado do Brasil e Estados Unidos da América apresentam valores mínimos de resistência à compressão de cerca de 4,5 N/mm².

Ensaio de flexão (BTC individuais)

Os resultados dos ensaios de flexão apresentam-se de forma sumária no Quadro 5, em termos de resistência à flexão na condição de secos ao ar ($f_{d,u}$) e resistência à flexão na condição de saturados ($f_{b,u}$). Além disto, observou-se que a rotura de todos os provetes ocorreu pela secção intermédia, indicando que o entalhe funcionou como se pretendia. No caso dos ensaios dos BTC secos ao ar a rotura foi frágil, passando a ser bastante suave no caso dos BTC saturados (ver Figura 6). A saturação dos BTC resultou também numa redução de resistência de 0,40 e 0,49 vezes, respetivamente, para a mistura SFA10 e SFA15. Observa-se, novamente, que uma maior percentagem de ligante geopolimérico parece traduzir-se numa maior resistência mecânica, e que este tipo de estabilização parece reduzir a variabilidade intrínseca dos materiais de terra.

Quadro 5: Resultados dos ensaios de flexão dos BTC individuais (coeficiente de variação entre parêntesis)

Mistura	γ_b (kg/m ³)	$f_{d,u}$ (N/mm ²)	$f_{b,u}$ (N/mm ²)	$f_{b,u} / f_{d,u}$
SFA10	1810 (1%)	1,8 (14%)	0,7 (36%)	0.40
SFA15	1854 (1%)	2,3 (11%)	1,1 (9%)	0.49

A resistência à flexão dos BTC não é propriamente o parâmetro mecânico de referência nos documentos que regulam internacionalmente a construção em BTC. Contudo, a norma NZS 4298:1998 estabelece que a resistência à flexão deverá ser superior a 0,25 N/mm², o que é um valor largamente excedido pelos BTC ensaiados para ambas as misturas. Esta norma indica também que a resistência à compressão dos BTC pode ser estimada como 3,5 vezes a resistência à flexão. Observa-se que neste caso esta estimativa está do lado da segurança, uma vez que a relação encontrada é de cerca de 5 vezes.

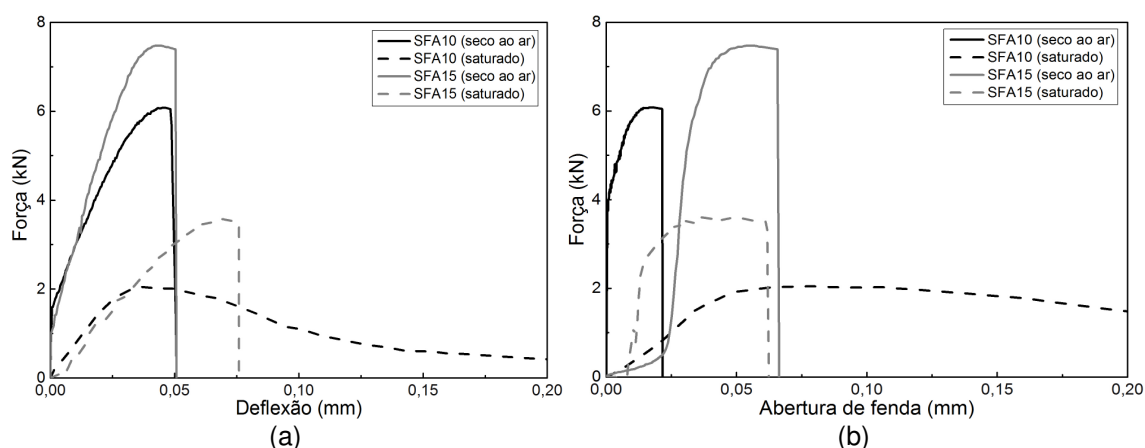


Figura 6: Curvas típicas dos ensaios de flexão em BTC individuais: (a) força-deflexão; (b) força-abertura de fenda

Ensaio de compressão (prismas)

Os resultados dos ensaios de compressão dos prismas de alvenaria encontram-se resumidos no Quadro 6, em termos de resistência à compressão ($f_{c,p}$) e módulo de elasticidade ($E_{0,p}$). Note-se que este último parâmetro foi calculado por regressão linear no intervalo de 5% a 30% do valor da

resistência à compressão da curva tensão-extensão de cada provete, apresentadas na Figura 7a. Algumas curvas apresentam-se com um desenvolvimento incompleto, que resulta da perda da leitura dos LVDTs, devido ao seu desprendimento com a evolução do dano. A acomodação das juntas secas é também evidenciada nas curvas tensão-extensão, através da observação de uma fase inicial de ajuste da deformação.

Quadro 6: Resultados dos ensaios de compressão dos prismas (coeficiente de variação entre parêntesis)

Mistura	$f_{c,p}$ (N/mm ²)	$E_{0,p}$ (N/mm ²)	$f_{c,p} / f_{c,u}^d$
SFA10	3,3 (15%)	551 (16%)	0,38
SFA15	4,6 (9%)	463 (8%)	0,39

Como seria expectável, os prismas construídos com os BTC produzidos com a mistura SFA15 registam valores de resistência à compressão superiores (em cerca de 1,4 vezes) aos de SFA10. Além disto, a redução de resistência à compressão dos BTC para os prismas foi de cerca de 0,4 vezes, o que corresponde a um fator de redução inferior ao estabelecido na norma NZS 4297:1998. De acordo com esta norma a resistência à compressão da alvenaria pode ser estimada como 0,5 vezes a resistência dos BTC, o que corresponde a uma sobrestimação, relacionada, possivelmente, com o facto de o sistema de alvenaria ser de junta seca. O contato direto dos BTC, sem argamassa de junta, pode conduzir à introdução tensões de tração localizadas, responsáveis por enfraquecer a alvenaria durante o seu carregamento.

Relativamente ao módulo de elasticidade, os prismas de ambas as misturas apresentaram valores semelhantes, o que parece indicar que a deformabilidade da alvenaria é controlada, principalmente, pela deformação das juntas. O modo de rotura dos prismas, ilustrado na Figura 7b, caracteriza-se por um padrão de fendilhação distribuído nos três BTC intermédios, enquanto que os BTC de contacto com as chapas de ensaio apresentaram pouca fendilhação, devido a um nível de confinamento superior. Além disto, observou-se a ocorrência de dano localizado nos BTC, nomeadamente através do destacamento das arestas e esmagamento nas juntas. Pensa-se que este tipo de dano se deva a concentração de tensões resultantes de imperfeições entre as superfícies de contato entre BTC.

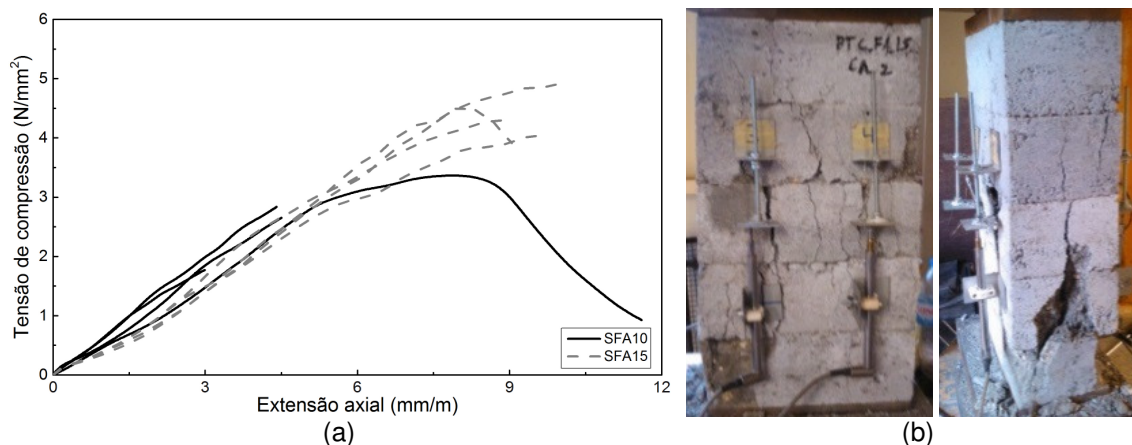


Figura 7: Resultados dos ensaios de compressão dos prismas: (a) curvas tensão-extensão; (b) modo de rotura

Ensaio de corte (prismas)

A Figura 8a apresenta curvas tensão de corte - deslocamento de corte típicas de prismas de ambas as misturas, em representação de cada nível de compressão. Os prismas com nível de compressão mais baixo apresentaram um comportamento mais suave, ao serem capazes de manter, em quase toda a fase de pós-pico, valores de tensão de corte próximas do máximo. Por outro lado, os prismas com nível de compressão mais elevado apresentaram um comportamento mais frágil, com uma perda

acentuada de tensão de corte na fase de pós-pico. Pensa-se que este comportamento se deva à ocorrência de um nível de dano maior.

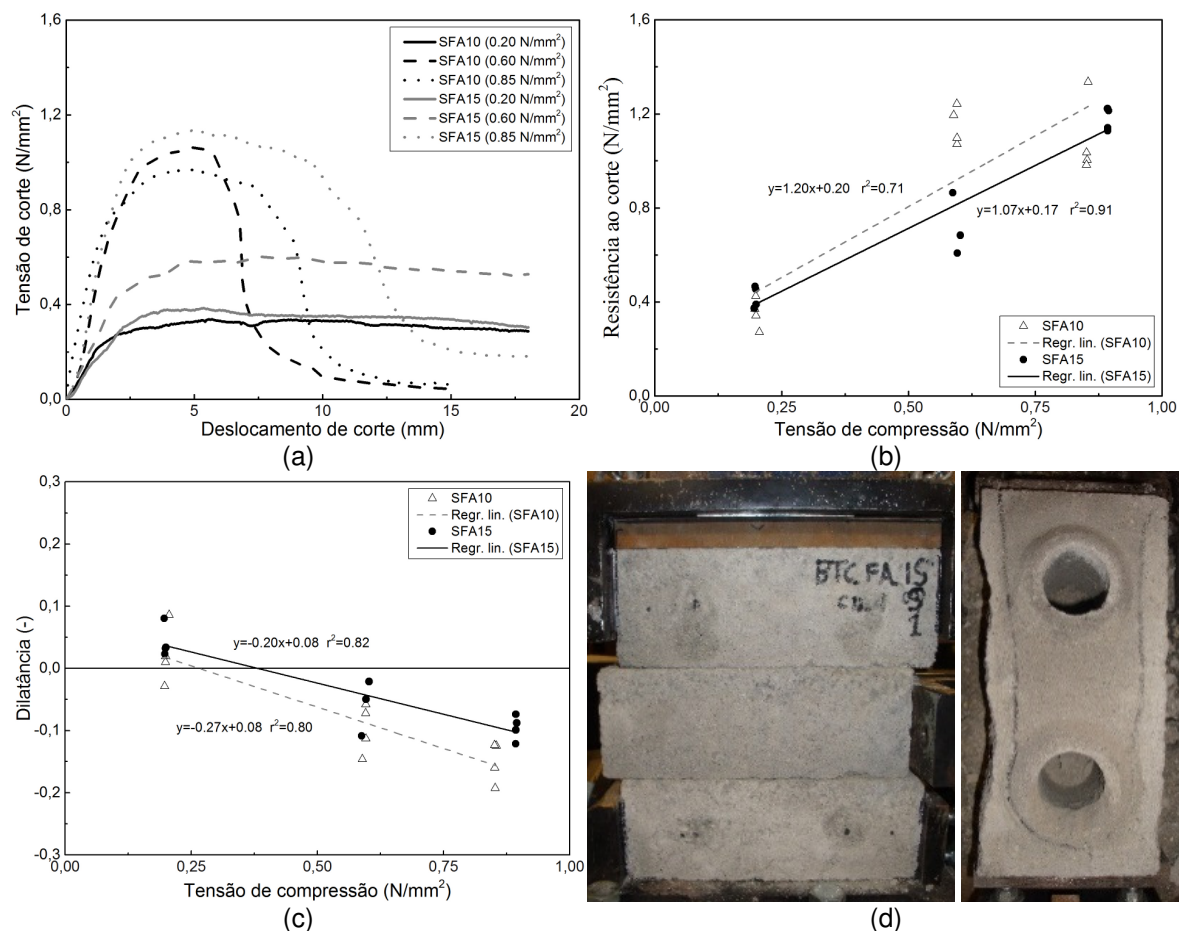


Figura 8: Resultados dos ensaios de corte: (a) curvas tensão-deslocamento de corte; (b) relação entre a resistência ao corte e o nível de compressão; (c) relação entre a dilatação e o nível de compressão; (d) modo de rotura típico

A relação entre a tensão de corte e a tensão de compressão é apresentada na Figura 8b, onde os provetes da mistura SFA15 revelam uma relação praticamente linear, enquanto que para a mistura SFA10, esta relação não é tão evidente. Pensa-se que o comportamento observado para este último caso esteja relacionado com a ocorrência de esmagamento e desgaste excessivos nas superfícies de contacto entre os BTC dos prismas com nível de compressão de 0,85 N/mm^2 . Isto significa que este nível de compressão foi, provavelmente, demasiado elevado em relação à resistência dos BTC, o que se traduz num maior nível de dano e numa consequente redução da resistência de corte. Apesar desta situação, as regressões lineares aplicadas aos pontos do gráfico permitem estimar valores da resistência ao corte inicial de 0,20 N/mm^2 e 0,17 N/mm^2 para a mistura SFA10 e SFA15, respetivamente. Estes valores, não nulos, indicam que a contribuição dos encaixes dos BTC para a resistência ao corte da alvenaria é importante. Relativamente ao coeficiente de atrito de pico ($\tan(\phi)$), foram obtidos valores de cerca de 1,20 e 1,07 para o caso da mistura SFA10 e SFA15, respetivamente. Estes são valores bastante elevados comparativamente ao valor de 0,4, proposto no Eurocódigo 6 (EN 1996-1-1:2006). Esta situação deve-se, provavelmente, a superfícies de contacto entre BTC aparentemente muito rugosas e de elevada dureza, e a uma contribuição do sistema de encaixe dos BTC.

A dilatação de cada prisma ensaiado foi também um parâmetro calculado para o ponto de tensão de corte máxima e é apresentado na Figura 8c em função do nível de compressão. No caso dos prismas

com nível de compressão de 0,20 N/mm² observam-se valores de dilatação positivos (afastamento axial dos BTC), em que o nível de compressão é insuficiente para vencer o efeito de rampa dos encaixes dos BTC. Nos restantes níveis de compressão, a dilatação torna-se negativa (aproximação dos BTC) devido ao esmagamento e desgaste das superfícies de contacto. Além disto, mostra-se que este efeito é mais pronunciado nos prismas da mistura SFA10, cuja resistência à compressão é inferior.

O modo de rotura típico dos prismas está ilustrado na Figura 8d, onde se demonstra que este consiste no deslizamento do BTC intermédio relativamente aos restantes. O sistema de encaixe dos BTC também foi observado no fim de cada ensaio, verificando-se que em praticamente todos os casos se deu a sua rotura. Além disto, observou-se que a superfície de contacto entre BTC não foi completa, o que permite explicar o esmagamento observado nesta zona para os níveis de compressão superiores. Possivelmente, este comportamento pode ser melhorado com a introdução de argamassa de assentamento.

Conclusões

O programa experimental apresentado neste artigo permitiu caracterizar o comportamento mecânico de uma solução construtiva de alvenaria de BTC produzidos com solo residual granítico, estabilizado com um ligante geopolimérico à base da ativação alcalina de cinza volante. Os resultados obtidos permitem demonstrar que esta é uma solução com elevado desempenho mecânico dentro da tipologia do sistema construtivo estudado. Mesmo para a mistura com menor percentagem de ligante geopolimérico (SFA10) o desempenho foi elevado, o que parece indicar que existe ainda margem para reduzir a percentagem de ligante, melhorando o desempenho ambiental da solução. Além disto, pensa-se que o desempenho mecânico pode ainda ser melhorado ao nível da produção dos BTC, com a utilização de prensas com níveis de compactação mais elevados, e ao nível do sistema de alvenaria, com a utilização de argamassa de assentamento. Embora os SRG apresentem variabilidade nas suas propriedades, pensa-se que a produção de BTC com SRG excedentes seja uma opção viável, tanto na utilização dos BTC em alvenaria estrutural como em alvenaria de enchimento. A utilização de outros solos excedentes é também uma possibilidade que deve ser testada futuramente. Além disto devem ser estudadas outras propriedades da solução, nomeadamente em termos do desempenho térmico e acústico e da durabilidade.

Agradecimentos

Este trabalho foi financiado por fundos do FEDER através do Programa Operacional Fatores de Competitividade – COMPETE e por fundos nacionais, através da Fundação para Ciência e a Tecnologia - FCT no âmbito do projeto POCI-01-0145-FEDER-007633 e da bolsa de pós-doutoramento FRH/BPD/97082/2013. Os autores agradecem ao Pedro Esteves o seu contributo na execução do programa experimental e ao Eng.^o Jorge Henriques, em representação da PEGOP – Energia Elétrica SA, pela disponibilização da cinza volante.

Referências bibliográficas

- ASTM C1314-03b:2003 – **Standard test method for compressive strength of masonry prisms**. West Conshohocken: American Society for Testing and Materials.
- CRISTELO, N., *et al*, 2015 – **Assessing the Production of Jet Mix Columns using Alkali Activated Waste based on Mechanical and Financial Performance and CO₂ (eq) Emissions**. Journal of Cleaner Production, 102 (2015), pp. 447–460.
- CRISTELO, N., *et al*, 2012 – **Residual Granitic Soil Improvement for Rammed Earth Construction**. In 13^o Congresso Nacional de Geotecnia – 13CNG, Lisboa: LNEC.
- DOAT, P., *et al*, 1979 – **Construire en Terre. CRAtterre**. Paris: Editions l'Harmatta. Collection AnArchitecture, 265pp.
- E 196:1966 – **Solos. Análise Granulométrica**. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- E 197:1966 – **Solos. Ensaio de Compactação**. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

- EN 1052-3:2002: **Methods of test for masonry. Part 3: Determination of initial shear strength.** Brussels: Committee European de Normalization (CEN).
- EN 1996-1-1:2005 – **Eurocode 6: design of masonry structures - part 1-1: common rules for reinforced and unreinforced masonry structures.** Brussels: Committee European de Normalization (CEN).
- EN 772-1:2011 – **Methods of test for masonry units. Part 1: Determination of compressive strength.** Brussels: Committee European de Normalization (CEN).
- EN 772-6:2002 – **Methods of test for masonry units. Part 6: Determination of bending tensile strength of aggregate concrete masonry units.** Brussels: Committee European de Normalization (CEN).
- EUROSTAT, 2015 – **Waste statistics.** [Consult. 28 de janeiro de 2016]. Disponível em http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Waste_statistics
- HOUBEN, H., GUILLAUD, H., 2008 – **Earth Construction: A comprehensive guide.** 3ª Edição. Marselha: France: Intermediate Technology Publications Ltd, 372pp, ISBN: 9781853391934
- MARTINHO, G., *et al*, 2015 – **Construction and Demolition Waste management in Portugal.** [Consult. 28 de janeiro de 2016]. Disponível em http://ec.europa.eu/environment/waste/studies/mixed_waste.htm#deliverables
- MOHAMAD, G., 2007 – **Mecanismo de ruptura da alvenaria de blocos à compressão.** Guimarães: Universidade do Minho.
- NP 83:1965 – **Solos. Determinação da densidade das partículas.** Caparica: Instituto Português da Qualidade (IPQ).
- NP 143:1969 – **Solos. Determinação dos limites de Consistência.** Caparica: Instituto Português da Qualidade (IPQ).
- NZS 4297:1998 – **Engineering design of earth buildings.** Wellington: Standards New Zealand.
- NZS 4298:1998 – **Materials and workmanship for earth buildings.** Wellington: Standards New Zealand.
- RAMOS, L.F., *et al*, 2011 – **As paredes divisórias num Sistema integrado de alvenaria estrutural em BTC.** In Seminário sobre Paredes Divisórias, Porto.
- SILVA, R.A., *et al*, 2013 – **Rammed earth construction with granitic residual soils: The case study of northern Portugal.** Construction and Building Materials, 47 (2013), pp. 181–191.
- SILVA, R.A., *et al*, 2015 – **Mechanical characterisation of dry-stack masonry made of CEBs stabilised with alkaline activation.** Construction and Building Materials, 75 (2015), pp. 349–358.
- SOARES, E., 2013 – **Improvement of granitic residual soil resorting to the alkali activation of fly ash.** Vila Real: Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro.
- TEIXEIRA PINTO, A. 2002 – **Novos sistemas ligantes obtidos por ativação alcalina (geopolimerização).** Construção Magazine.
- TORGAL, F.P., JALALI, S., 2011 – **O renascimento da construção com alvenaria de terra.** Angola: Revista Maquinaria.
- TORGAL, F., *et al*, 2009 – **A Construção em Terra.** Guimarães: TecMinho, 175pp, ISBN: 9789728692407
- UNE 41410:2008. **Bloques de tierra comprimida para muros y tabiques - Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo.** Madrid: AENOR.
- VIANA DA FONSECA, A., 1996 – **Geomecânica dos solos residuais do granito do Porto. Critérios para dimensionamento de fundações directas.** Universidade do Porto.
- WALKER, P.J., STACE, T., 1997 – **Properties of some cement stabilised compressed earth blocks and mortars.** Materials and Structures, 30 (1997), pp. 545–551.